Développement d'un modèle de microclimat urbain pour cartographier l'îlot de chaleur urbain

Julie SORIANO[1,2], Lucie MERLIER[1], Damien DAVID[1], Frédéric KUZNIK[1], Lionel SOULHAC[2]

[1] Univ Lyon, CNRS, INSA-Lyon, Université Claude Bernard Lyon 1, CETHIL UMR5008, F-69621, Villeurbanne, France
[2] Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique UMR CNRS 5509, École Centrale de Lyon, Université Claude Bernard Lyon 1, INSA Lyon, 69134 Écully Cedex, France
julie.soriano@insa-lyon.fr

RESUME. Un nouveau modèle de microclimat urbain est présenté, dont le but est de cartographier l'îlot de chaleur urbain à l'échelle de la ville et sur une période de quelques semaines.
L'originalité du modèle présenté repose sur deux aspects. Premièrement, la géométrie considérée est un réseau de rues canyon, ce qui simplifie à la fois la mise en donnée et la paramétrisation par rapport à une géométrie complétement explicite. Par ailleurs, le modèle s'inspire du modèle de dispersion de polluants SIRANE, notamment pour la paramétrisation aéraulique. Ainsi, la méthode de panache gaussien – qui est à l'origine conçue pour la dispersion des polluants – est utilisée pour modéliser le transport de chaleur dans la couche limite urbaine.
La description des phénomènes thermiques a été validée pour une rue sans végétation. Une simulation sur le même cas d'étude a ensuite été effectuée en modélisant des arbres, et permet de constater que les résultats observés correspondent à la physique attendue.

MOTS-CLÉS : modèle de microclimat urbain, rue canyon, arbres.

ABSTRACT.This contribution presents a new urban microclimate model which aims to map the urban heat island at the city scale over a few weeks.
The originality of the model relies on two aspects. First, the considered geometry is a street canyon network, which simplifies both the data setting and the parametrization compared to a completely explicit geometry. Secondly, the model is inspired from the pollutent dispersion model SIRANE, especially for the aerolic parametrization. Thus, a gaussian plume model – which is originally a pollutant dispersion model – is used to model the heat transport in the urban boundary layer.
The thermal phenomenon description is validated in a street without vegetation. A simulation on the same case study but with trees is also conducted, and allows to verify that the observed results are corresponding to the expectations.

KEYWORDS : urban microclimate model, street canyon, trees.

1. INTRODUCTION

L'atténuation de l'Ilot de Chaleur Urbain (ICU) est une préoccupation qui touche le domaine scientifique, politique et citoyen. Ce phénomène aggrave en effet les conséquences des vagues de chaleur sur la santé et le confort des populations urbaines, ainsi que sur les consommations d'énergie. Dans ce contexte, la modélisation du microclimat urbain est un outil précieux pour évaluer des configurations urbaines hypothétiques afin d'évaluer des solutions d'adaptation.

Pour étudier le microclimat urbain, plusieurs types de modèles existent. La première catégorie regroupe les modèles ayant recours à la CFD, du type Envi-met (Bruse 1999). Ces modèles, fréquemment utilisés, fournissent des résultats détaillés mais coûteux en temps de calcul, ce qui limite donc la période de simulation ainsi que la taille du domaine simulé. Ensuite, des Modèles de Canopée Urbaine (MCU) sont également souvent utilisés et simulent les phénomènes physiques sur une rue avec les propriétés moyennes d'un quartier. Un exemple des ces modèles est Town Energy Balance (Masson 2000). Une troisième catégorie – moins démocratisée à ce jour – émerge, et regroupe les modèles zonaux, qui représentent explicitement la géométrie urbaine et n'utilisent pas de CFD, comme EnviBatE (Gros 2013).

Le modèle présenté ici est proche la troisième catégorie, avec une géométrie seulement partiellement explicite, ce qui réduit le temps de mise en donnée et de calcul. Il a pour vocation de simuler la distribution spatiale des températures d'air et de surfaces à l'échelle du quartier voire de la ville et pendant une période de quelques semaines pour des ressources de calcul limitées. Ses résultats pourront à terme servir deux objectifs : l'évaluation du confort d'été extérieur ou/et la production de conditions limites pour des modèles de bâtiments.

Le modèle sera décrit dans un premier temps, puis validé pour une rue isolée sans végétation. Un cas d'application de rue isolée arborée sera ensuite étudié.

2. DESCRIPTION DU MODELE

La structure du modèle est décrite sur la Figure 1.

Tout d'abord, la ville est représentée par deux zones :

- La Canopée Urbaine (CU), qui comprend les rues et des intersections, ainsi que des toits. Les toits et les rues sont des sources (ou puits) de chaleur. Un transport (advection) horizontal de chaleur à lieu dans le réseau de rues, à travers les intersections.
- La Couche Limite Urbaine (CLU), au-dessus de la CU, dans laquelle un panache Gaussien est utilisé pour propager la chaleur dégagée (ou absorbée) par la canopée urbaine. Ce modèle ne sera pas détaillé ici (Soulhac et al. 2011).

Les liens entre ces deux zones se font au niveaux des toits, qui chauffent le panache; des intersections entre les rues, où l'advection verticale est prise en compte; et enfin aux niveau des rues, où l'advection et la diffusion entre la rue et la CLU sont modélisées. Ce modèle reprend certaines équations du modèle

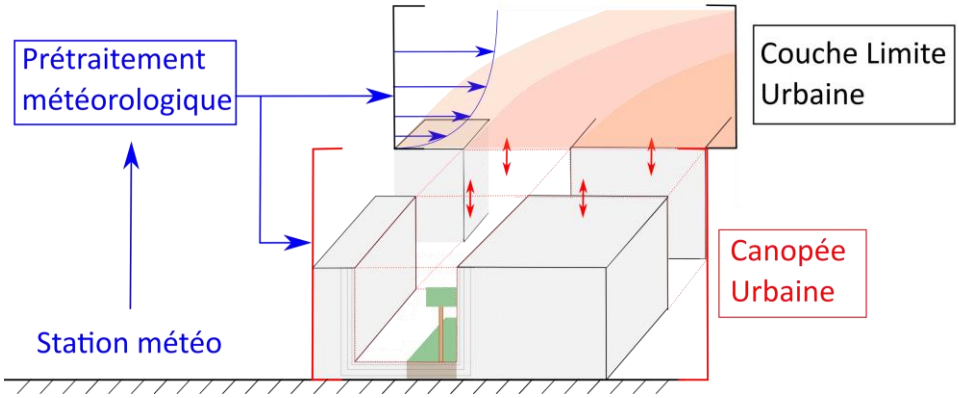

Figure 1: Description du modèle

de dispersion de polluants SIRANE (Soulhac et al. 2011), notamment pour la paramétrisation aéraulique de la CU et pour le panache Gaussien dans la CLU.

Enfin, les données météorologiques mesurées à la station météo sont prétraitées (cadre bleu sur la Figure 1) afin d'obtenir la stabilité atmosphérique en ville et une vitesse de friction pour le domaine étudié. Ce prétraitement ne sera pas détaillé ici (Soriano et al. 2021). Pour l'instant, la condition limite de température d'air en amont du domaine urbain simulé est prise égale à celle de la station météo – le domaine simulé doit donc être suffisamment grand pour que la température s'initialise.

2.1. MODELE THERMIQUE DE RUE

Chaque rue est traitée d'une façon similaire à un Modèle de Canopée Urbaine (MCU) à une couche. Cinq éléments sont considérés : les deux murs, la route, le sol végétalisé et les arbres. Un bilan de chaleur est réalisé sur chacun de ses éléments, considérant les flux radiatifs, convectifs, conductifs et latents. Le flux latent est supposé nul pour les surfaces artificielles et le flux conductif est supposé nul pour les arbres.

2.1.1. Modèle radiatif

Les corps sont supposés gris par bandes et deux bandes sont considérées, appelées par convention Grandes Longueurs d'Ondes (GLO) et Courtes Longueurs d'Ondes (CLO). La méthode des radiosités est utilisée pour chaque bande spectrale, et une infinité de réflexions est considérée.

Les arbres sont pris en compte par l'introduction de transmittances, basées sur Redon (2017). Ces transmittances τ_i sont calculées en adaptant pour chacun des trajets (sol-ciel, mur-ciel, sol-mur, mur-mur) les bornes de l'intégrale b_{1i} et b_{2i}:

$$\tau_i = 1 - f_t\left(1 - \exp\left(-k \int_{b_{1i}}^{b_{2i}} LAD\right)\right) \quad \textbf{(1)}$$

Où f_t est la fraction horizontale arborée, k est le coefficient d'extinction qui dépend de l'espèce d'arbre et qui représente l'orientation des feuilles et LAD est la Leaf Area Density en m²/m³. L'utilisation de l'équation **(1)** a été comparée à du lancé de rayon pour un grand nombre de cas (non montré), et a montré une erreur moyenne sur les transmittances de 10 %.

2.1.2. Modèle d'évapotranspiration

Le flux latent pour les arbres et le sol végétalisé s'exprime par :

$$Q_{Ei} = A_i \lambda_{vap} \rho \, \frac{q^*(T_i) - q_{air}}{r_s + r_a} \quad \textbf{(2)}$$

Où Q_{Ei} $[W]$ est le flux latent avec i l'indice des arbres ou du sol végétalisé, A_i $[m^2]$ est la surface d'échange, λ_{vap} $[J/kg]$ est la chaleur latente de vaporisation, $q^*(T_i)$ est l'humidité spécifique à saturation à la température de la surface, q_{air} est l'humidité spécifique de l'air et r_s et r_a $[s/m]$ sont les résistances stomatiques et aérauliques.

Pour le sol végétalisé, l'équation **(2)** est utilisée telle quelle. Pour les arbres en revanche, le fait de négliger la conduction permet d'utiliser la simplification de Penman-Monteith. Cela permet, en utilisant certaines hypothèses, de faire disparaitre la température de surface de l'équation **(2**, ce qui évite d'avoir à itérer. Cette méthode a été choisie pour ne pas rajouter de la complexité inutile au système, dans la mesure où l'erreur introduite par la formule de Penman-Monteith apparaît bien inférieure à celle qui provient de la paramétrisation des résistances aérodynamique et stomatique.

2.1.3. Modèle convectif

La convection pour les murs, la route et le sol végétalisé est déterminée à l'aide de coefficients convectifs provenant de corrélations et dépendant de la vitesse de l'air dans la rue. Actuellement, la vitesse longitudinale moyenne (décrite partie 2.2.1) est utilisée dans ces corrélations car elle est la seule connue. Toutefois, des travaux sont en cours pour améliorer ce point.

Pour les arbres en revanche, aucun coefficient convectif n'est utilisé, et le flux convectif est déterminé par déduction comme le dernier terme inconnu du bilan de chaleur. Cela est autorisé par le fait que le flux conductif est négligé, ainsi que par l'utilisation de la formule de Penman-Monteith.

2.1.4. Modèle conductif

La conduction dans les murs et le sol est évaluée à l'aide de l'équation de Fourier 1D avec sur trois couches. La condition limite pour le sol est une condition de flux nul, ce qui est une hypothèse très utilisée dans les MCU, par exemple dans (Masson 2000). Celle pour les murs et les toits est une condition de température de surface intérieure fixe, dans l'attente d'un modèle de bâtiment.

2.2. TRANSPORT DE CHALEUR DANS LA CANOPEE URBAINE

2.2.1. Ecoulement dans les rues

La vitesse moyenne longitudinale dans les rues est calculée selon la paramétrisation de SIRANE (Soulhac et al. 2011). Cette paramétrisation a été déterminée pour une rue infinie, avec deux murs de même taille, en considérant deux zones :

- une zone sous l'influence des murs, où l'écoulement est parallèle à ceux-ci et où l'équation de Navier-Stockes est appliquée
- une zone sous l'influence du sol, où un profil logarithmique correspondant à une couche limite rugueuse est appliqué.

Le calcul de la vitesse moyenne longitudinale fait intervenir la vitesse de friction et la stabilité de l'écoulement externe, eux-mêmes issus du prétraitement météorologique.

2.2.2. Flux aux intersections

Aux intersections, un bilan de matière est réalisé. Le flux entre l'intersection et la CLU est déterminé de manière à ce que ce bilan soit fermé. Pour déterminer dans quelle(s) rue(s) s'écoule le flux provenant d'une rue donnée, l'hypothèse que les lignes de courant ne se croisent pas est appliquée.

2.2.3. Ecoulement entre les rues et l'atmosphère

L'advection et la diffusion entre une rue et la CLU sont modélisées en utilisant une vitesse d'échange u_d calculée par :

$$u_d = \frac{\sigma_w}{\sqrt{2}\,\pi} \qquad \textbf{(3)}$$

Avec σ_w l'écart-type de la vitesse verticale en m/s, paramétrisé en fonction de la vitesse de friction de l'écoulement de la CLU et de la stabilité atmosphérique.

Cette équation est utilisée dans SIRANE (Soulhac 2000). Elle se base sur l'hypothèse que la turbulence provenant de l'écoulement externe est dominante par rapport à celle créée à l'interface et provient de l'application des équations de Navier-Stockes à l'interface.

3. VALIDATION DU MODELE DE RUE SANS VEGETATION

3.1. DESCRIPTION DU CAS D'ETUDE

L'expérimentation ClimaBat (Djedjig et al. 2015) est constituée de quatre rues canyon échelle 1/10 orientées Nord/Sud, situées sur le campus universitaire de La Rochelle. Ici, une rue canyon sans végétation est utilisée pour la comparaison. L'instrumentation dans la rue canyon expérimentale est représentée sur la Figure 2. Ce banc d'essai est utilisé pour comparer les mesures et une simulation sur la semaine du 20 au 26 août 2012. Toutes les propriétés des matériaux sont connues. Le temps sur la période simulée était estival, avec quelques nuages sur la deuxième partie de la semaine et un vent sur le toit allant de 1 m/s à 6 m/s.

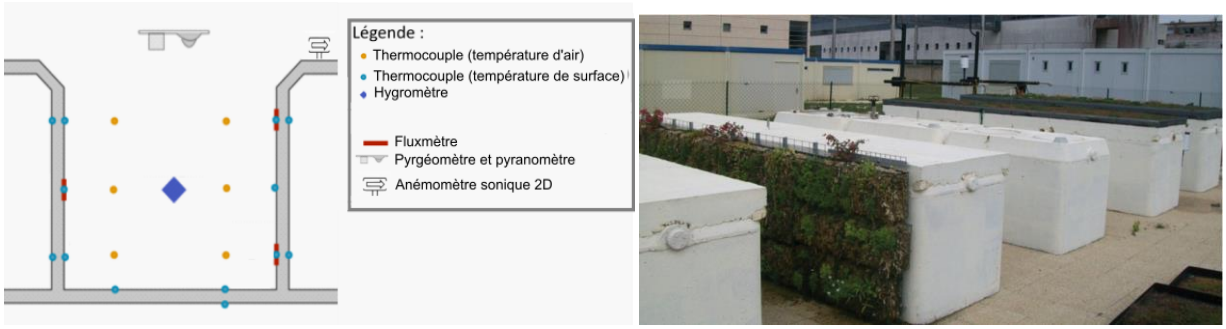

Figure 2 : Mesures dans une rue expérimentale ClimaBat (à gauche) et photo du dispositif expérimental (Djedjig et al. 2015)

Le modèle est forcé avec les flux CLO et GLO entrant dans le canyon et les températures intérieures des murs à chaque pas de temps. La température au-dessus de la rue n'étant pas disponible, la température d'air dans la rue est également forcée, ce qui n'empêche que la validation de l'échange rue/atmosphère. La vitesse de friction n'est pas modélisée par le prétraitement météorologique, mais simplement calculée à partir de l'anémomètre sonique sur le toit en supposant un profil vertical de vitesse neutre.

3.2. RESULTATS

Quatre grandeurs ont été comparées : les flux stockés sur les deux murs, la température de surface du sol et le flux solaire sortant de la rue. Les RMSE (erreur quadratique moyenne) sont répertoriées dans le Tableau 1.

Tableau 1: RMSE des grandeurs comparées

	Flux solaire quittant la rue	Température du sol	Flux stocké mur ouest	Flux stocké mur est
Valeur absolue	18 W/m²	2,0 K	22 W/m²	34 W/m²
Pourcentage de l'amplitude moyenne journalière	9 %	10 %	16 %	24 %

On observe un comportement satisfaisant du modèle radiatif CLO sans végétation, avec une RMSE de seulement 9 % de l'amplitude journalière sur le flux sortant. Etant donné que les équations pour les GLO sont très similaires à celles pour les CLO, ces résultats sont rassurants vis-à-vis de la fiabilité du modèle radiatif complet.

Ensuite, l'erreur sur la température du sol est relativement faible également, surtout en considérant que la température est mesurée en deux points seulement alors qu'elle est simulée sur la moyenne de la surface.

Ce sont sur les flux stockés sur les murs que l'erreur est la plus grande, les courbes sont donc représentées Figure 3. Plusieurs raisons peuvent être considérées pour expliquer les écarts observés. Premièrement, les mesures sont faites en un ou deux points du mur, alors que le modèle simule le flux stocké moyen sur le mur entier. Ceci pourrait expliquer que les écarts sur le mur ouest et ceux sur le mur ouest n'aient pas la même tendance, étant donné que les mesures ne sont pas faites symétriquement sur les deux murs (voir Figure 2).

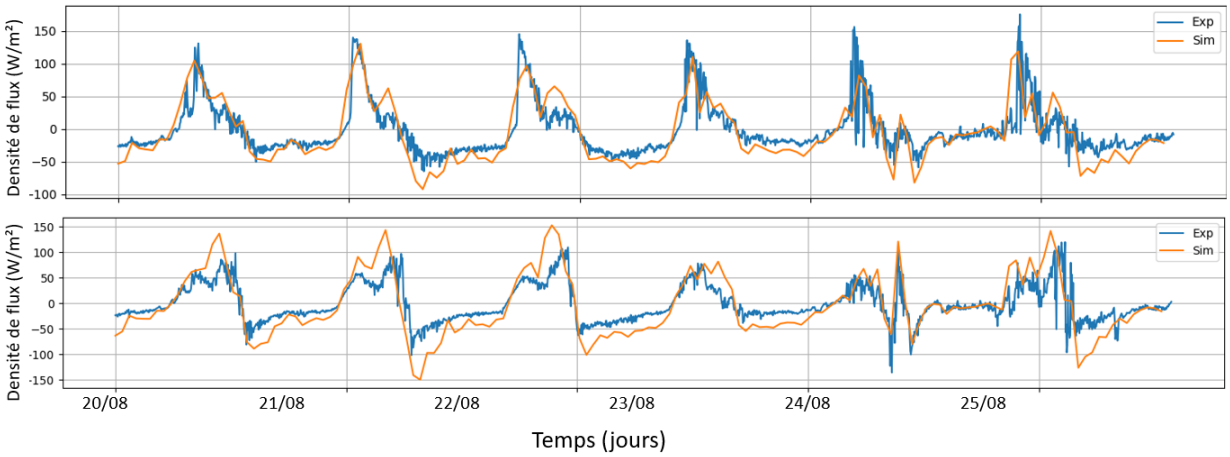

Figure 3: Mesures et simulation de la densité de flux stocké sur le mur est (bas) et ouest (haut)

Par ailleurs, le flux conductif est calculé dans la simulation comme le résiduel des flux radiatifs et convectifs, tout en étant le plus faible des trois. Cela implique donc que l'erreur sur le flux conductif cumule celle sur les flux radiatifs et convectifs, tout en étant la plus grande des trois en pourcentage.

Dans l'ensemble, le modèle reproduit bien la dynamique et les ordres de grandeurs des différents flux et des températures de surface, ce qui permet de valider la description des phénomènes thermiques dans une rue sans végétation.

4. CAS D'APPLICATION : RUE VEGETALISEE

4.1. DESCRIPTION DU CAS D'ETUDE

Le même cas d'étude que précédemment à La Rochelle a été repris, en y introduisant cette fois-ci des arbres de manière à vérifier que leur effet correspond aux attentes physiques, sans pouvoir comparer à des mesures, en l'absence de données. La paramétrisation choisie pour les arbres est décrite dans le Tableau 2. Il a été choisi d'étudier ici le cas d'arbres correctement irrigués (sans stress hydrique).

Tableau 2 : Paramétrisation des arbres

Fraction de recouvrement horizontal	Hauteur minimum des arbres	Hauteur maximum des arbres	Leaf Area Index
50 %	6 m	9 m	3 m²/m²

Les différents forçages décrits dans la partie précédente pour la validation ont été supprimés, et la rue a été passée à échelle réelle (c'est-à-dire haute de 13 m et large de 11,2 m). Les résultats ont été analysés

sur la journée du 20/08/2012. La simulation a été initialisée en appliquant les mêmes conditions météo pendant cinq jours.

4.2. RESULTATS

La répartition des flux dans le bilan thermique des arbres est représentée Figure 4 (à gauche). Tout d'abord, rappelons que le stockage de chaleur dans les arbres est supposé nul. En journée, ils interceptent une partie du rayonnement solaire, qu'ils dissipent sous forme latente et sensible. Les échanges net en grandes longueurs d'ondes des arbres sont quasiment nuls en journée. En effet, ils recueillent les émissions des surfaces minérales plus chaudes, et se rafraichissent en émettant vers le ciel. Ici, ces deux effets se compensent quasiment. La nuit, en revanche, les surfaces minérales étant moins chaudes, les arbres se refroidissent légèrement par GLO. Ils se réchauffent donc par convection pour compenser cet effet, et induisent donc un léger rafraichissement de l'air de la rue.

Un des principaux effets des arbres est, grâce à l'ombrage, de diminuer le stockage de chaleur dans les murs et le sol en journée (Figure 4 à droite). Cela a deux effets bénéfiques. D'une part, les températures de surfaces augmentent moins au cours de la journée. D'autre part, le flux déstocké par les surfaces minérales la nuit est moins important, la température d'air est donc également moindre. Ici, un rafraichissement de 0,17 °C environ de la température d'air moyenne dans la rue a été observé la nuit.

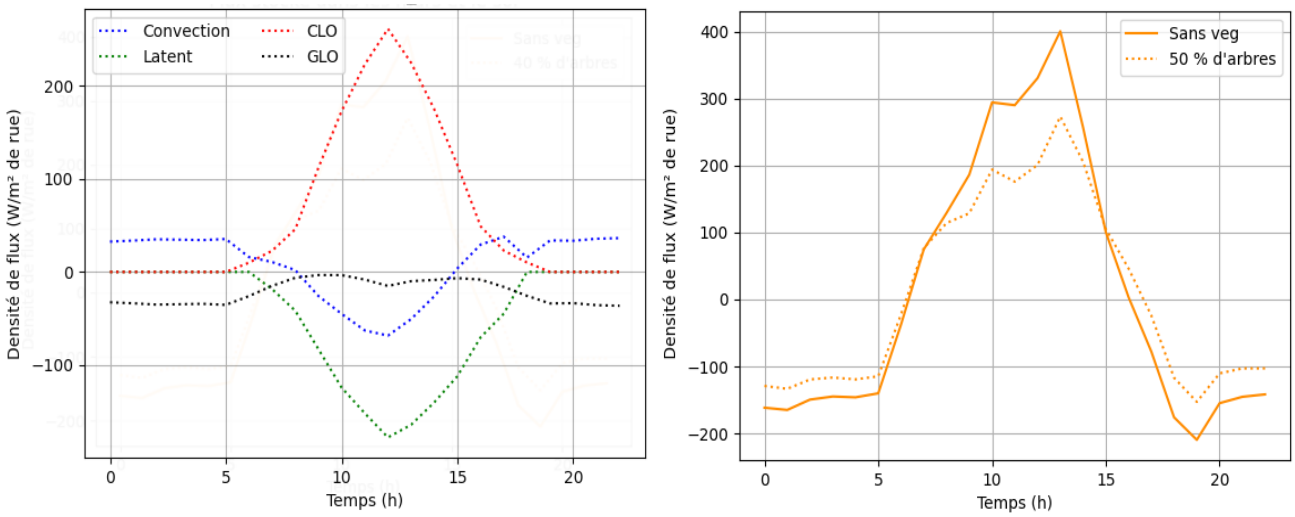

Figure 4: Bilan thermique sur les arbres (à gauche) et Flux stocké dans les murs et le sol (à droite)

Sur ce cas d'étude, la température d'air moyenne dans la rue atteint un rafraichissement maximal de 0.25 °C à 15h. A ce moment, les arbres interceptent un flux solaire encore important (100 W/m²) et le dissipent entièrement sous forme latente (la courbe bleue croise l'origine sur la Figure 4 à gauche). De plus, les surfaces minérales ayant bénéficié de l'ombrage toute la journée, elles sont moins chaudes en en milieu d'après-midi dans le cas arboré.

En début de matinée, au contraire, la présence d'arbre n'impacte quasiment pas la température d'air moyenne dans la rue. En effet, le déficit de stockage de chaleur dans les murs et le sol n'est pas encore significatif (Figure 4 à droite). De plus, la température de l'air étant plus faible le matin, les arbres éprouvent moins le besoin de transpirer : ainsi, par exemple, 73 % du rayonnement solaire est évacué par évapotranspiration à 10h contre 100 % à 15h.

5. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

La représentation d'une rue sans végétation a été validée et le modèle est capable de quantifier les différents flux de chaleur des arbres et leur impact dans la rue.

Etant donné que de nombreux paramètres interviennent dans la modélisation des arbres, il sera indispensable de procéder à une validation sur une rue arborée avec des mesures expérimentales. Le transport de chaleur dans la canopée à l'échelle du quartier devra également être validé. En parallèle, une meilleure paramétrisation des coefficients convectifs est souhaitée et un travail est en cours sur ce sujet, à l'aide de simulations CFD-LES avec ProLB (Jacob and Sagaut 2018).

A plus long terme, le modèle présenté inclura une meilleure représentation des bâtiments, ainsi qu'un modèle hydrologique, nécessaire pour mieux paramétriser l'évaporation. Le flux anthropique devra également être considéré. Enfin, l'influence des cours sera prise en compte.

6. REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient Emmanuel Bozonnet pour l'accès aux données de ClimaBat, et l'Institut Carnot pour son support et financement.

7. BIBLIOGRAPHIE

Bruse, Michael. 1999. "Simulating Microscale Climate Interactions in Complex Terrain with a High-Resolution Numerical Model: A Case Study for the Sydney CBD Area (Model Description)." *International Conference on Urban Climatology & International Congress of Biometeorology, Sydney,* no. Microscale models: 6.

Djedjig, Rabah, Emmanuel Bozonnet, Rafik Belarbi, and La Rochelle. 2015. "Experimental Study of the Urban Microclimate Mitigation Potential of Green Roofs and Green Walls in Street Canyons," no. April 2013: 34–44. https://doi.org/10.1093/ijlct/ctt019.

Gros, Adrien. 2013. "Modélisation de La Demande Énergétique Des Bâtiments à l'échelle d'un Quartier." Université de La Rochelle.

Jacob, J., and P. Sagaut. 2018. "Wind Comfort Assessment by Means of Large Eddy Simulation with Lattice Boltzmann Method in Full Scale City Area." *Building and Environment* 139: 110–24. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.05.015.

Masson, Valéry. 2000. "A Physically-Based Scheme for the Urban Energy Budget in Atmospheric Models." *Boundary-Layer Meteorology* 94 (September 1999): 357–97. https://doi.org/10.1023/A:1002463829265.

Mballo, S., S. Herpin, M. Manteau, S. Demotes-Mainard, and P. E. Bournet. 2021. "Impact of Well-Watered Trees on the Microclimate inside a Canyon Street Scale Model in Outdoor Environment." *Urban Climate* 37 (April): 100844. https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100844.

Redon, Emilie. 2017. "Modélisation de La Végétation Urbaine Comme Régulateur Thermique," no. Umr 3589.

Soriano, Julie, Lucie Merlier, Damien David, and Lionel Soulhac. 2021. "Development of an Urban Microclimate Model to Assess the Air Temperature Field during the Summer Period." In *International Building Performance Simulation Association*. Bruges.

Soulhac, Lionel. 2000. "Modélisation de La Dispersion Atmosphérique à l'intérieur de La Canopée Urbaine." Ecole Centrale de Lyon.

Soulhac, Lionel, Pietro Salizzoni, F. X. Cierco, and Richard Perkins. 2011. "The Model SIRANE for Atmospheric Urban Pollutant Dispersion; Part I, Presentation of the Model." *Atmospheric Environment* 45 (39): 7379–95. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.07.008.